



TITLE:

<高校生のページ>電波と電気とエネルギー

AUTHOR(S):

篠原, 真毅; 三谷, 友彦

CITATION:

篠原, 真毅 ...[et al]. <高校生のページ>電波と電気とエネルギー. Cue 2016, 35: 57-62

ISSUE DATE:

2016-03

URL:

<https://doi.org/10.14989/210150>

RIGHT:

高校生のページ

電波と電気とエネルギー

生存圏研究所 生存圏電波応用分野
(工学研究科 電気工学専攻 電波工学講座 マイクロ波エネルギー伝送分野)
篠原 真毅, 三谷 友彦

1. はじめに：電波のはなし

皆さんは「電波」と聞くと何を思い浮かべるでしょうか？テレビの電波？携帯の電波？宇宙を観測する電波望遠鏡？電波は何か分からなくても、電波によってどこか遠くの放送局からテレビの内容が届いたり、遠く離れた人とも電話線が無くても電話やメールが出来たり、宇宙の果てから届く何らかの情報を得て宇宙を調べたりする、ことは実感していると思います。遠く離れていても線でつながなくても何か情報が届くというとなんだか魔法使いになったような気がします。しかし、実際は情報を送る人と受ける人との間には「電波」があり、この電波が情報を伝えているのです。

「電波」とは漢字だけ見ると「電気」の波ということになります。電波とはもっと広い単語として「電磁波」という物理現象のうち、私たち人間がいろいろと使いやすい種類のものを電波と呼んでおり、少し狭い意味で使われています。電磁波には光も含まれます。それでは「電磁波」とはなんでしょうか？これはやはり漢字の通りで「電気と磁気の波」ということになります。電気と磁気、と2つ並ぶと授業で習った内容で思い浮かべるのは電磁石や発電機ではないかと思えます。電磁石は、釘等にコイル(電線)を巻き、そのコイルに電流を流すと釘等が磁石になるというものです(図1(a))。発電機はコイルのそばで磁石を回転させるもしくは動かす(もしくはコイルと磁石の関係が逆)と、その磁石の回転/運動によってコイルに交流電流が発生するというものです(図1(b))。つまり電気と磁気はそれぞれがそれぞれを生み出す関係になっています。電磁石はアンペールの法則という法則で定式化され、発電機はファラデーの電磁誘導の法則で定式化されます。電気が磁気を作り、磁気が電気を作るのであれば、電気→磁気→電気→磁気→…と連鎖します。磁石のおかげで磁気は遠く離れたものにも効くのは実感していると思いますが、実は電気も同じく遠く離れても間に何も無くても効くのです。その場合、電気というよりも「電場(もしくは電界)」と呼び、磁気は「磁場(もしくは磁界)」と呼びます。この電場と磁場が連鎖して遠くへ伝わっていくもの、これが電磁波ということになります(図1(c))。ただしこの図1(c)のイメージは正確ではありません。電場も磁場も時間と空間で複雑に関係しながら電磁波は空間を伝わっていきますので、こんなにきれいに電場と磁場は分かれません。電波の送信受信には金属製のアンテナを用います。残る漢字「波」は、上下に揺れるもののイメージだと思いますが、「磁石を回転させる」等がこの「揺れる」ことに相当し、電気では交流(プラスとマイナスで揺れている電気)ということになります。アンペールの法則とファラデーの電磁誘導の法則を一般化し、さらに他の物理法則をも統合した電磁波を記述する統一理論がマクスウェル方程式と呼ばれる4つの方程式系です。

電磁波は電気と磁気の波ですから、電気も含まれることになり、電気もマクスウェル方程式を用いて説明できます。電気というとオームの法則を習ったと思いますが、オームの法則は実用上有用な式で、マクスウェル方程式の一部になります。電磁波(電波)は、電気も含まれますから、電気であるともいえます。それでは電気と電波、何が違うのでしょうか？電気は線を伝わり、電波は空間を飛んでくる、これは本質ではありません。電波もアンテナで受信した後は電気回路の中を伝わります。一番の違いは周波数です。周波数とは波が1秒間に何回揺れるか、の指標で、単位はHz(ヘルツ)です。コンセン

トから来ている電気の周波数は 50/60Hz で、FM ラジオの電波の周波数は例えば 80.2MHz です。(MHz=10⁶Hz) 最近必ず家にある無線 LAN は多くは 2.45GHz (GHz=10⁹Hz) を使っています。この周波数が低く、線を伝わると電気と呼び、周波数が高く空間を飛びやすいものを電波と呼んでいるだけです。違いはこれだけですので、電波は電気である、と言ってしまってもあながち間違いではありません。そして知ってのとおり電気は電気エネルギーというエネルギーの一つです。電気は明るくしたり、ものを暖めたり、力を生み出すこと（発電機の逆でモーターの原理）もできます。エネルギーは他に位置エネルギー、運動エネルギー、熱エネルギー等がありますが、電気は、そして電波はこのエネルギーの仲間なのです。電子レンジが一番の例です。電子レンジはマイクロ波と呼ばれる電波（2.45GHz の電波）を使い、ものを暖めます。つまり、電波エネルギーが熱エネルギーに変換されているのです。このように、電波は電気であり、エネルギーでもあるということになります。

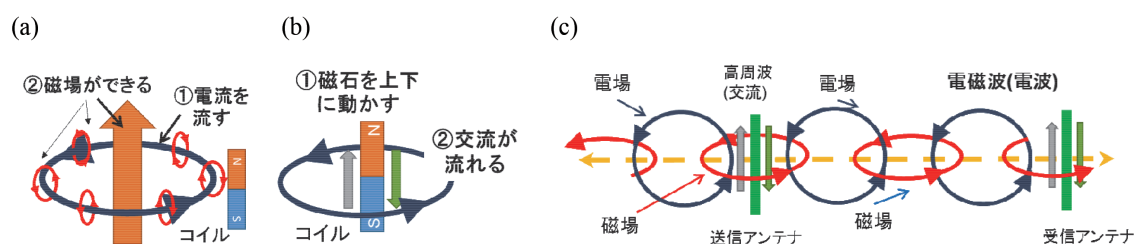


図 1 (a) 電気→磁気（アンペールの法則） (b) 磁気→電気（ファラデーの電磁誘導の法則） (c) 電磁波（マクスウェル方程式）

2. 電波で電気を送る（無線で電気を送る）

電波は私たちの目には残念ながら見えませんが、私たちの周りには今電波まみれです。テレビ、ラジオ、携帯電話、無線 LAN、車のレーダー等々。電波は実は人間が自ら作り出したもの以外には自然界にはほとんど存在しません。ですので、NASA が宇宙人を探すときは電波を受信するのです。知的生命体が存在しないと強い電波はないからです。電磁波の一種である光は太陽があったため、太古の昔から存在していました。そのため地球上の生物はその目で光を認識できるように発生しましたが、電波は自然界には存在していなかったため、生物は電波を見ることができないと勝手に考えています。マクスウェル方程式を作った J. C. マクスウェルは光の研究をしていて、アンペールの法則（1820 年）とファラデーの電磁誘導の法則（1831 年）の関連に気づき、マクスウェル方程式を立てることで逆に電波の存在を予言したのです（1864 年）。実際に電波の存在が確認されたのはマクスウェル方程式の発表の約 20 年後です（1888 年）。周波数の単位にもなっている H. ヘルツが実験によって電波の存在を確認し、始めて電波の存在が確認されました。そしてその約 10 年後にはもう無線通信が実用化され始めます（G. マルコーニによる大西洋横断通信実験の成功は 1901 年）。電波は宇宙の果てからでも届く性質があり、大西洋すら横断して情報を伝えられるため、電波を使った無線通信が私たちの生活を一変させました。

無線通信においては電波は情報を乗せる乗り物に過ぎません。光通信は電波ではなく光を乗り物として情報を送るのに使います。しかし、説明してきたように、電波は電気でありエネルギーであり、そして無線で遠くまで届きます。ですので、電波を使うと無線で遠くまで電気を届けることが出来ます。この技術を実無線電力伝送やワイヤレス給電技術と呼びます [1]。電波まで使わなくても、アンペールの法則とファラデーの電磁誘導の法則で近似できる非常に短い距離を磁場や電場でワイヤレスで給電する技術もあります [2]。例えば「Qi 規格」という規格の、置くだけ携帯電話の充電器はいくつかのスマートフォンに標準装備されていたり、後付けタイプが電気屋さんで買うことが出来ます。IC カードもこの磁場を用いたワイヤレス給電を行っています。しかし、これらのワイヤレス給電は数 cm も電気を無

線で送ることが出来ません。電波を用いれば何万 km 先にも電気を届けることが出来ます（通信と同じです）。

効率よく電波で電気を送るためには、アンテナ技術が重要となります。効率よく電波で電気を送るためには通常マイクロ波と呼ばれる GHz 程度の周波数の電波を用います。マイクロ波を用いたワイヤレス給電をマイクロ波無線電力伝送と呼びます。そして電波の周波数を電気の周波数に変換し、効率よく電気として使うためにはマイクロ波回路技術や半導体技術が必須となります。アンテナは最適化設計をすることで効率よく電波を出し入れするようにするのですが、空間を飛ぶ電波はすべてマックスウェル方程式に従い伝播しますので、実は工学的には手が付けられません。アンテナの大きさと距離、周波数を決めてしまえば電波の伝送効率はまだ決まってしまう。例えば周波数が高ければ電波をビームのように絞れ、同じアンテナ同じ距離で効率は高くなります。マックスウェル方程式そのものに現在のところ疑問の余地はありません。マックスウェル方程式を何とかしたい人は工学部ではなく理学部向きだと思います。逆に理論と実際が非常によく合うために、工学的な設計はやりやすく、工学者の腕の見せ所です。そして効率よく電気として使うためのマイクロ波回路技術や半導体技術は工学者の腕の見せ所です。エネルギー保存則がありますので変換効率 100% 以上には勿論なりませんが、回路や半導体を組み合わせ、いかに 100% に近い電波→電気変換（周波数変換）を行なうかが研究となります。一般に半導体を用いた周波数変換回路では周波数が高いほど効率は下がります。しかし、これは理論的な限界ではなく、よい半導体が出来たり、新しい回路方式が提案されたりすれば同じ周波数でもまだまだ効率を高くすることは出来ます。周波数が高くなると電波を飛ばすところはマックスウェル方程式により伝送効率は上がり、回路の変換効率は下がります。マックスウェル方程式には逆らえません。今の技術力ではマイクロ波程度の周波数の電波が総合効率（伝送効率と回路の効率との掛け算）では最大となるため、今はマイクロ波を使った研究が多いですが、工学者の今後のがんばりで無線電力伝送用にもっと高い周波数を使えるようになるかもしれません。

無線電力伝送は、携帯電話やドローンや電気自動車という移動する相手にも無線で電気を送ることが利点です。電波を用いた無線電力伝送は大きく分けると図 2 のように 3 つに分けることが出来ます。図 2 (a) は「電気を送る」イメージに一番近い、1 箇所の送電点から 1 箇所の受電点に全電波エネルギーを集中させ、電線に負けない伝送効率を実現しようとするもので、ビーム型と呼んでいます。しかし、このビーム型は「思っているよりも」アンテナの大きさが理論的に大きくなってしまったために、まだ実用化には研究が必要です。そこであえて電線との勝負を避け、無線通信的ないつでもどこでもの良さを使う無線電力伝送が図 2 (b) です。テレビや携帯電話のように同時にたくさんのユーザーが、どこにいても電気を無線もらえるシステムで、ユビキタス型と名付けました。ユビキタスとはラテン語で「いたるところに存在する」という意味です。これであれば無線で電気を送るという利点をより生かすことが出来ます。またインターネット・オブ・シングス (IoT) というすべてのものをネットにつなぐ夢の構想にも応用できます。IoT とは何兆個のセンサーをいたるところに設置するイメージです。IoT ではすべてのものが無線通信する必要があり、すべてのものが電気を必要とすることになりますが、電池を何兆個もばら撒くよりも無線で電気を送った方がいいでしょう。携帯電話を部屋の中のどこにいても無線で充電する装置は複数のアメリカのベンチャー会社が製品化を始めていますし、電池レスセンサーは日本のメーカーも商品化しています。無線通信と同じように電波で電気を送るのであれば、最初からもう私たちの周りにある無線通信用の電波を使って電気を作り出すことも可能です。これは図 2 (c) に示す電波エネルギーハーベスティングと呼ばれています [3]。これは専用が送電器も要りませんし、新しく電波を放射しないので新たな電波の干渉問題はすでにクリアされており、最も実用化に近いといわれています。日本やアメリカのベンチャーがハーベスティングを用いた農業用湿度センサー（日本）や携帯の充電補助装置（アメリカ）を販売しようとしています。ハーベスティングは今ある通信用の電波

を利用するため、その電力密度が非常に小さいのが難点とされます。

私たちの研究室ではマイクロ波無線電力伝送の研究を先代から数えてもう 30 年以上行なっています。最近ではドローンを利用して火山観測センサーや被災者位置センサーをマイクロ波で駆動するビーム型とユビキタス型の間のようなシステムの実証実験に 2015 年 7 月に成功しました (図 3 (a))。このドローン実験は 2016 年には福島で野外実験も計画しています。ZigBee という無線センサーを電池レス化し、さらに電波の干渉を避けられる新しいシステムの実験も 2012 年頃から始め、2014 年には実証実験にも成功しました (図 3 (b))。マイクロ波よりも一桁高い周波数を用いて高効率に電波→電気回路変換をするチップの開発にも企業との共同研究で成功しています (図 3 (c))。2013 年から京都大学が推進する Center of Innovation (COI) という大きな産学連携研究プロジェクト (「活力ある生涯のための Last 5X イノベーション拠点」) で医学研究科の先生とも協力し、2015 年にはお年寄りがよく使う電動車いすのマイクロ波充電システムの開発や、医療用各種センサーの電池レス化を目指したユビキタス型マイクロ波無線電力伝送センサーの開発にも成功しました。

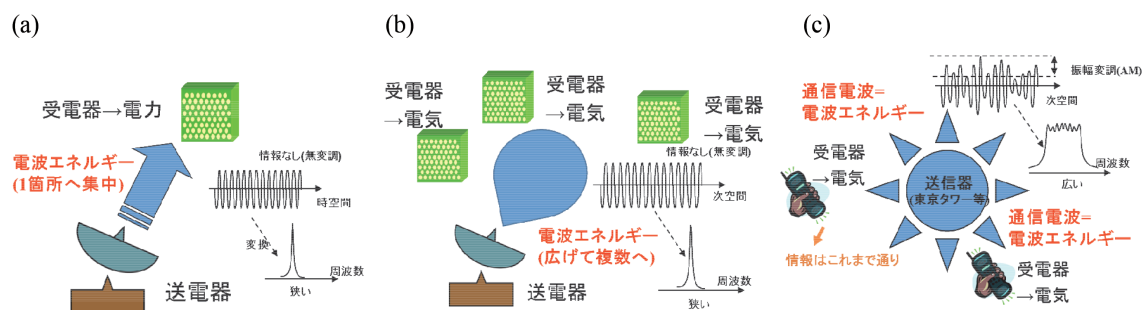


図 2 (a) ビーム型無線電力伝送 (b) ユビキタス型無線電力伝送 (c) 電波エネルギーハーベスティング

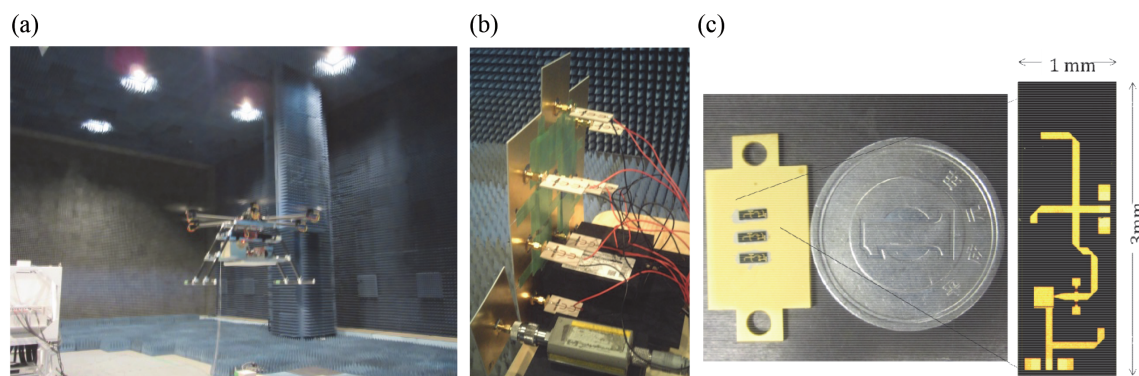


図 3 (a) ドローンから地上のセンサーへの無線電力伝送実験 (2015) (b) 干渉低減型電池レス ZigBee ワイヤレスセンサー (2014) (c) 24GHz MMIC チップ型整流回路 (2013)

3. 電波で電気を送る未来にある宇宙開放系の持続可能な生存圏—まとめにかえて—

今は電話やインターネットがほぼすべて無線で使えてあたりまえになりました。10 年ほど前に比べるとなんと私たちは自由になったことでしょう。しかし、まだ私たちは電池を持ち運び、電池が切れる心配をして、コンセントを探して毎日充電しなければなりません。私たちは電池が切れて誰かと繋がらなくなることをまだ恐れて暮らしています。もし電気すら無線で届き、いつでもどこでも電池切れの心配をしなくてもいい社会が実現できればどんなにいいことでしょう。先述の京都大学の COI プロジェクトで、無線電力伝送研究は大きな研究グループの一部に過ぎませんが、この漠然とした不安を様々な技

術で解消し、「しなやかほっこり社会を実現する」をキーワードに研究をしています。

さらに無線電力伝送が実現するのは「しなやかほっこり社会」だけではありません。ビーム型の無線電力伝送を用いると、宇宙空間に浮かべた太陽電池で発電した莫大な電力（100 万 kW 程度）を地上に無線で送るという宇宙太陽発電所 SPS（Solar Power Satellite/Station, 図 4）も実現できる可能性があります [4]。太陽電池を宇宙に浮かべマイクロ波無線電力伝送を行なうと、宇宙はほぼ夜がありませんし、マイクロ波は雨雲で減衰することはほぼありません。メガソーラー発電所の問題は、昼夜天候で発電量が大きく左右されるため、安定性にかけ、そのためバックアップ用の他の発電所を必要とし、結果とても電気代が高くなることです。SPS は同じ太陽電池でも昼夜天候に関係なく発電できるようになるため発電が安定し、ロケット代を加えても発電コストを下げる事が出来ます。もちろん地球温暖化の原因の二酸化炭素もほぼ排出しません。SPS は地球環境問題を解決できる一手法なのです。しかし、100 万 kW の太陽光発電所である SPS は、マックスウェル方程式によって数 km サイズの大きさとなり、重量 1 万トン程度の超巨大な衛星となる点が問題とされています。私たちの研究室を含め世界中で研究がされているにもかかわらず、SPS プロジェクトそのものに GO サインはまだ出ていません。しかし、逆にこれだけ大きな衛星を作れる技術を人類が持てば、いずれ宇宙コロニーや月移住だってできるようになるかもしれません。このままでは人間がその活動を継続すれば、地球はその限界にすぐなってしまう。環境問題はもとより、食料やエネルギーも取り合いになってしまうでしょう。そうなる前に、私たちは宇宙環境を早く利用して、私たちが生きるのに必要な「生存圏」を大きくするべきと思っています。これを「地球閉鎖系」から「宇宙開放系」へのパラダイムシフトと呼び、宇宙開放系の持続可能な生存圏の構築を考えており、そのため私たちの所属は「生存圏研究所」という名前になっています。そして宇宙開放系の持続可能な生存圏の構築するために必須なのは科学技術であり、特にマイクロ波無線電力伝送技術だと考えます。最近「科学技術は悪」的な雰囲気がありますが、私たち人間は科学技術を駆使しなければ生存を維持できません。良くも悪くも私たち人間は科学技術を利用しなければならないと私たちは考えます。そして人間と地球と自然とを共存させる新しい宇宙開放系の持続可能な生存圏の実現を目指し、私たちはマイクロ波無線電力伝送の研究を行なっているのです。



図 4 宇宙太陽発電所 SPS とマイクロ波無線電力伝送

参考文献

- [1] 篠原真毅, 小紫公也, “ワイヤレス給電技術—電磁誘導・共鳴送電からマイクロ波送電まで— (設計技術シリーズ)”, ISBN978-4-904-77402-1, 科学情報出版, 2013.2
- [2] 篠原真毅 (監修), “電界磁界結合型ワイヤレス給電技術—電磁誘導・共鳴送電の理論と応用—”, ISBN978-4-904774-28-1, 科学情報出版, 2014.12
- [3] 堀越智, 竹内敬治, 篠原真毅, “エネルギーハーベスティング 身の周りの微小エネルギーから電気を創る” 環境発電 “”, ISBN978-4-526-07309-0, 日刊工業新聞社, 2014.10
- [4] 篠原真毅 (監修), “宇宙太陽発電 (知識の森シリーズ)”, ISBN978-4-274-21233-8, オーム社, 2012.7